

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ПУЧКОВЫХ ТРЕКОВ В  
ЭКСПЕРИМЕНТЕ  $BM@N$

КУРСОВАЯ РАБОТА 2 КУРСА

Выполнил: Студент 209 группы 2 курса

Физического факультета МГУ Зайцев Егор Кириллович

Научный руководитель: к.ф.-м.н., Мерц Сергей Павлович

Москва – 2026

## **Аннотация**

Эксперимент  $BM@N$  – первый запущенный эксперимент на комплексе NICA. Он предназначен для изучения столкновения релятивистских пучков тяжёлых ионов с неподвижной мишенью. Это позволяет достигать высоких плотностей барионной материи. С помощью нуклотрона на установке можно провести эксперименты с различными частицами: от протонов до ионов золота. После столкновения иона с мишенью, на установке можно зафиксировать траекторию пролёта пучка. Для этого, в эксперименте используются 3 кремниевых детектора SIBT, которые восстанавливают траекторию пролёта пучка (трек) по трем точкам. Далее, с помощью программного пакета  $VmnRoot$ , применяя метод реконструкции, получаются параметры и вершина трека. Однако, из-за особенностей детекторов SIBT, фиксируются также и «ложные» точки, которые учитываются при проведении реконструкции. В результате, из-за комбинаторики, получается очень много треков, что сильно замедляет работу программы. В этой работе рассмотрены способы фиксации частиц, методы анализа качества восстановленных пучковых треков и расчета исходной вершины пучка.

## Оглавление

1. Эксперимент BM@N.....	4
2. Особенности детекторов SiBT.....	6
3. Восстановление пучковых треков в эксперименте BM@N.....	8
4. Анализ качества восстановленных пучковых треков.....	12
5. Заключение.....	14
6. Список использованных источников.....	15

## 1. Эксперимент $BM@N$ .

Эксперимент  $BM@N$  - первый запущенный эксперимент в комплексе NICA. В нём исследуются столкновения пучков релятивистских тяжелых ионов с неподвижной мишенью. Эксперимент предназначен для исследования фазовой диаграммы КХД, ограничения параметров уравнения состояния высокоплотной ядерной материи. Также, энергия пучков в установке  $BM@N$  достаточно высока, чтобы исследовать мезоны и гипероны со странными кварками в ядро-ядерных реакциях при энергии близкой к кинетическому порогу.

Схема установки представлена на рис. 1.

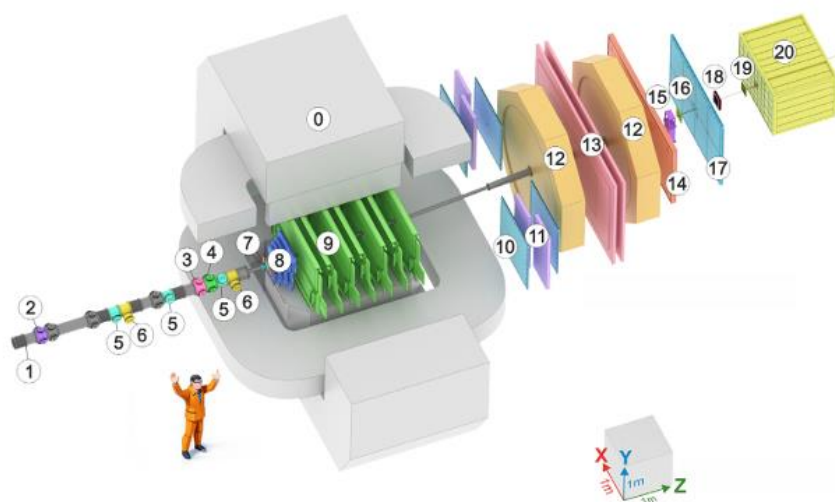


Рис. 1. Схема установки в эксперименте  $BM@N$

Установка содержит большое количество станций и детекторов. Частицы из нуклотрона сначала попадают в вакуумную трубу под цифрой 1, которая предназначена для уменьшения рассеяния пучков тяжёлых ионов на их пути. Далее, под цифрами 5 обозначены 3 детектора для фиксирования траектории (трека) пучка SiVT, о них будет подробно рассказано в следующей главе. Затем, ионы попадают в мишенную станцию (7). Она предназначена для сохранения вакуума при производстве различных операций с мишенями. Далее, находится

анализирующий магнит (0) для измерения импульса рождённых частиц и фрагментов пучка. В нём находятся детекторы GEM (9), которые измеряют координату и импульс. После чего, пучок попадает в серию детекторов, среди которых есть времяпролётные системы TOF400 (11) и TOF700 (14), предназначенных для идентификации заряженных частиц, детектор из сцинтилляционных пластин ScWall (14), калориметр FNCal (20) и годоскоп FQH (19) для измерения энергии и заряда частиц.

## 2. Особенности детекторов SiBT

Три кремниевых детектора SiBT отвечают за измерение траектории иона, нахождение первичной вершины, измерение угловых параметров траектории частицы. Каждый детектор фиксирует частицу при помощи ортогональных полос - электродов, на которых подано напряжение – стрипов. Её координата получается при прохождении пересечения стрипов - образующиеся электронно-дырочные пары летят к ближайшим электродам, по импульсам тока с которых и регистрируются координаты. При этом, можно увидеть различный угол поворота стрипов у разных детекторов: если первый из них повёрнут так, что считывающие полосы расположены параллельно осям X и Y, то у второго и третьего они отклонены на 30 и 60 градусов соответственно.

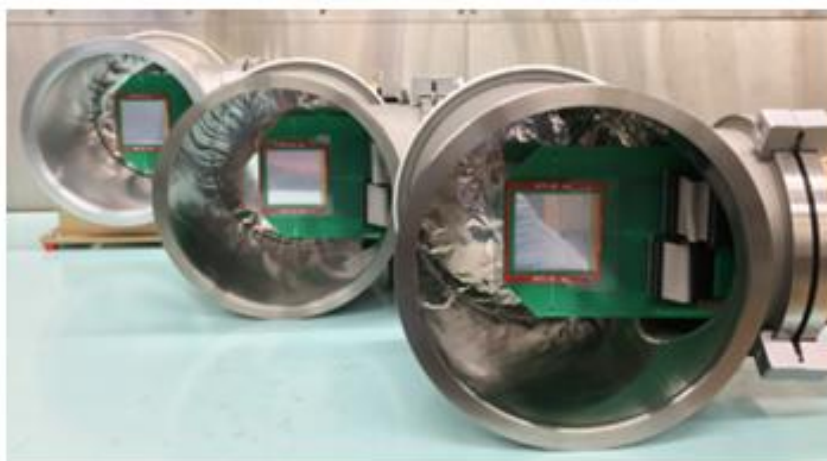


Рис 2. Вид станций SiBT

После прохождения пучка через SiBT, производится построение трека частицы по трем точкам, по одной с каждого детектора. Однако, в реальности при нахождении хитов – то есть импульсов от стрипов в том месте, где была зафиксирована частица, возникает множество так называемых “ложных” событий. Они могут быть связаны как с внешними шумами, так и с тем, что один ион был зафиксирован на одном пересечении стрипов, а на этом же детекторе другой был зафиксирован на пересечении других полос. В

результате, из-за комбинаторики получается много троек точек, и следовательно, много треков. Это, в свою очередь, может создавать сложности при нахождении первичной вершины пучка и нахождения параметров пучка в силу большого времени работы кода. Следовательно, нужно предварительно отобрать лучшие треки для оптимизации задачи, о чем говорится в следующих главах.

### 3. Восстановление пучковых треков в эксперименте BM@N

Для анализа и обработки данных, зафиксированных в эксперименте на различных детекторах, используется фреймворк BmnRoot на базе пакета Root. Этот программный пакет предоставляет широкие возможности реконструкции треков, физического анализа, построения распределений параметров частиц. В BmnRoot написаны программы для формирования треков, их сглаживания. С помощью данного фреймворка можно смоделировать пучок частиц заданного типа. В данной работе генерировались ионы Xe с помощью генератора ION. Это происходит с помощью макроса run\_sim\_bmn.C. Выбранный генератор частиц задаёт начальные параметры пучка. В нашем случае, это параметры иона ксенона: его заряд, массовое число, энергию, количество ионов, импульс. Также задаётся стартовая точка пучка и его апертура по двум осям. Обозначение осей в детекторе указано на рисунке 1.

```
// Set the BM@N geometry from the Geometry Database
GeoSetup gSetup;
int errStatus = gSetup.LoadSetupToFairRunSim("run8_dev_25.11.01");
if (errStatus != 0) {
    cout << "ERROR: Geometry not loaded. Error status " << errStatus << endl;
    exit(-1);
}
// geometry(fRun); // load BM@N geometry from macro file

// Use the experiment specific MC Event header instead of the default one
// This one stores additional information about the reaction plane
// MpdMCEventHeader* mcHeader = new MpdMCEventHeader();
// fRun->SetMCEventHeader(mcHeader);

// Create and Set Event Generator
FairPrimaryGenerator* primGen = new FairPrimaryGenerator();
fRun->SetGenerator(primGen);

// Smearing of beam interaction point, if needed, and primary vertex position
// DO NOT do it in corresponding gen. sections to avoid incorrect summation!!!
// parameters for period 8
primGen->SetBeam(0.4376, 0.1239 - 0.3, 0.4537, 0.6925); // (beamX0, beamY0, beamSigmaX, beamSigmaY)
primGen->SetBeamAngle(0.011, 0.0, 0.0, 0.0); // (beamAngleX0, beamAngleY0, beamAngleSigmaX, beamAngleSigmaY)
primGen->SetTarget(-400.5, 0.175); // (targetZ, targetDz)
primGen->SmearVertexZ(kTRUE);
primGen->SmearGausVertexXY(kTRUE);
```

Рис. 3. Задание начальных координат и угловых параметров пучка

```

case ION: {
    // Start beam from a far point to check mom. reconstruction procedure (Z, A, q, mult, [GeV] px, py, pz, [cm]
    // vx, vy, vz)
    FairIonGenerator* fIongen = new FairIonGenerator(54, 124, 54, 1, 0., 0., 4.65, 0., 0., 0.); // Xe
    primGen->AddGenerator(fIongen);
    break;
}

```

Рис. 4. Задание начальных параметров частиц генератором ION

Далее, детекторы SiBT находят хиты, по которым в дальнейшем производится реконструкция. Она происходит методом фитирования окружностью по трём получившимся с каждого детектора точкам.

После реконструкции и получения треков, к ним применяется фильтр Калмана для получения их более точных параметров.

Рассмотрим значение координаты при пересечении трека с детектором с номером  $k$ . Из эволюции системы, оно равно:

$$x_k = f_{k-1}(x_{k-1}) + w_{k-1}$$

Где  $f_{k-1}$  – пропагатор трека от детектора  $k-1$  к  $k$ -му детектору,  $w_{k-1}$  – случайная величина, обусловленная рассеянием частиц, или шум процесса. Измеренные значение координаты могут быть представлены в виде

$$m_k = h_k(x_k) + \epsilon_k$$

$\epsilon_k$  – шум измерения. Отметим также линейность функций  $f_k$  и  $h_k$ .

Рассмотрим теперь случай, когда у трека есть несколько параметров. В таком случае, эволюция системы получает вид:

$$x_{k,i} = F_{k-1}x_{k-1,i} + w_{k-1}$$

А измеренные координаты представляются в виде:

$$m_k = H_{k-1,i}x_{k-1,i} + \epsilon_k$$

Далее, фильтр Калмана раскладывается на 3 этапа: предсказание, фильтрация и сглаживание. На этапе предсказания, вектор состояния  $x$  экстраполируется при  $k-1$  известных измерений

$$x_k^{k-1} = F_{k-1} x_{k-1}$$

Далее, экстраполируется ковариационная матрица – матрица из ковариаций всех параметров. Например, для параметров  $y$  и  $z$  со средними  $y_0$   $z_0$  ковариация равна  $E[(y-E[y])(x-E[x])]$ ,  $E[x]$  – математическое ожидание  $x$ .

$$C_k^{k-1} = F_{k-1} C_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1}$$

Где  $Q_{k-1}$  – ковариация шума процесса. Далее происходит экстраполяция невязок и их ковариационной матрицы.

$$r_k^{k-1} = m_k - H_k x_k^{k-1}$$

$$R_k^{k-1} = V_k + H_k C_k^{k-1} H_k^T$$

На следующем этапе, происходит фильтрация значений вектора состояния. Она выполняется с использованием матрицы усиления Калмана  $K$ :

$$x_k = x_k^{k-1} + K_k (m_k - H_k x_k^{k-1})$$

$$K_k = C_k^{k-1} H_k^T (V_k + H_k C_k^{k-1} H_k^T)^{-1}$$

Далее, для вектора состояния обновляется ковариантная матрица:

$$C_k = (I - K_k H_k) C_k^{k-1}$$

Аналогичную процедуру проводят и для невязок. Далее, с использованием невязок, вычисляется приращение хи-квадрат.

$$\chi_+^2 = r_k^T R_k^{-1} r_k$$

Третьим этапом фильтра Калмана является сглаживание. Здесь учитываются измерения на протяжении всего трека, в то числе и те, которые должны случиться после настоящего момента

$$\mathbf{x}_k^n = \mathbf{x}_k + A_k(\mathbf{x}_{k+1}^n - \mathbf{x}_{k+1})$$

$$A_k = C_k F_k^T (C_{k+1})^{-1}$$

Обновление ковариационной матрицы имеет вид:

$$C_k^n = C_k + A_k(C_{k+1}^n - C_{k+1})A_k^T$$

Таким образом, на выходе мы получаем уточненный трек.

#### 4. Анализ качества восстановленных пучковых треков.

Из-за особенностей детекторов SiVT, упомянутых в главе 2, может быть много комбинаций по три точки, что замедляет реконструкцию треков. Поэтому, нужно отобрать лучшие треки для каждого события по статистическим критериям. Мы будем отбирать 10 лучших треков по хи-квадрат. Для этого, создадим массив, который вмещает 10 кандидатов, и создадим тройной цикл для перебора комбинаций по три хита. Для каждой из таких комбинаций создаётся трек, и далее происходит отбор наилучших треков по критерию хи-квадрат таким образом, что, когда массив из кандидатов заполнен, в нём заменяется элемент с наихудшим значением хи-квадрат.

```
BmnStatus BmnBeamTracking::FindTracks()
{
    vector<BmnSiBTHit*> sortedHits[fSiBTDetector->GetNStations()];
    SortHits(sortedHits);
    Double_t Xv = 0.0;
    Double_t Yv = 0.0;
    Double_t Zv = 0.0;

    const Int_t nTrMax = 10;
    Int_t nTr = 0;

    BmnTrack sortedCandidates[nTrMax];

    for (BmnHit* hit2 : sortedHits[2]) {
        for (BmnHit* hit1 : sortedHits[1]) {
            for (BmnHit* hit0 : sortedHits[0]) {
                BmnTrack cand;
                cand.AddHit(hit0->GetIndex(), hit0);
                cand.AddHit(hit1->GetIndex(), hit1);
                cand.AddHit(hit2->GetIndex(), hit2);
                cand.SortHits();

                if (CalculateTrackParams(&cand) != kBMNERROR) {
                    if (nTr == nTrMax) {
                        for (Int_t i = 0; i < nTr; ++i) {
                            if (cand.GetChi2() < sortedCandidates[i].GetChi2()) {
                                sortedCandidates[i] = cand;
                            }
                        }
                    } else {
                        sortedCandidates[nTr] = cand;
                        nTr++;
                    }
                }
            }
        }
    }
}
```

Рис. 5. Реализация отбора лучших треков по критерию хи-квадрат

Таким образом, мы получили лучшие возможные треки, которые дальше сглаживаются, с применением фильтра Калмана, описанного в предыдущей главе. Для каждого события имеем не более 10 таких треков. Далее смоделируем 50 событий, проведём для них реконструкцию и построим распределения их параметров, а именно их координат на мишени по  $X$  и  $Y$ , отклонения от центра мишени  $V$  и направляющих тангенсов  $T_x$  и  $T_y$ .

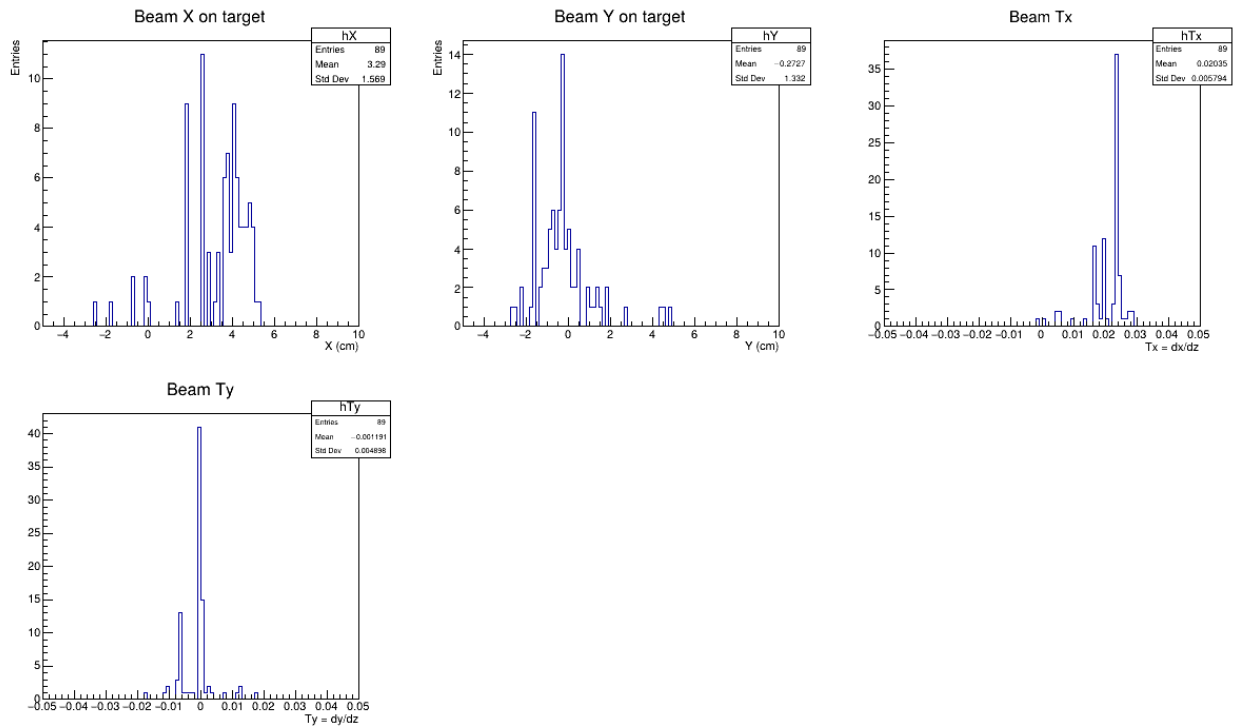


Рис. 6. Распределения параметров треков

По распределениям можно видеть, что тангенсы  $T_x$  и  $T_y$  не испытывают сильных изменений, и остаются примерно на том же уровне. В то время как координаты пучка на мишени  $X$  и  $Y$  хоть и не различаются критически, но всё же есть определённый разброс. По  $X$  были зафиксированы значения от -2,5 до 6, по  $Y$  от примерно -3 до примерно 5

## 5. Заключение

В данной работе были проанализированы пучковые треки, получившиеся в эксперименте  $BM@N$ .

В первой и второй главах рассмотрены общие сведения об установке  $BM@N$ , его компонентах и детекторах. В частности, были рассмотрены кремниевые детекторы SiVT, особенности фиксации в них частиц и проблемы, связанные с этим.

В третьей главе были рассмотрены основные возможности фреймворка  $BmnRoot$  для симуляции пучков и реконструкции треков. Также, были описаны основные принципы работы фильтра Калмана.

В 4 главе был разобран алгоритм отбора 10 лучших треков по критерию хи квадрат. Далее, были построены и проанализированы распределения их параметров.

Таким образом, в работе был рассмотрен эффективный алгоритм отбора лучших треков для оптимизации задачи их реконструкции в эксперименте  $BM@N$ .

## **6.Список использованных источников**

1. S. Afanasiev et al – The BM@N spectrometer at the NICA accelerator complex, Nucl. Instrum. Meth A 1065 (2024) 169532
2. P. Batyuk, K. Gertsenberger, S. Merts, O. Rogachevsky - The BmnRoot framework for experimental data processing in the BM@N experiment at NICA
3. R. Fruhwirth - Application of Kalman filtering to track and vertex fitting, Nucl. Instrum. Meth. A 262 (1987) 444–450.